

УДК 528.831.1

**СТАНКЕВИЧ С.А.**, Науковий центр аерокосмчних досліджень Землі ІГН НАН України, головний науковий співробітник, доктор технічних наук, доцент  
**ШКЛЯР С.В.**, Науковий центр аерокосмчних досліджень Землі ІГН НАН України, науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук  
**ЛУБСЬКИЙ М.С.**, Науковий центр аерокосмчних досліджень Землі ІГН НАН України, аспірант

## **ПІДВИЩЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ РОЗРІЗНЕННОСТІ АЕРОЗНІМАННЯ НА ОСНОВІ СУБПІКСЕЛЬНОЇ РЕЄСТРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ**

*В багатьох випадках одержувані аерознімком бракує просторової розрізненості для ефективної обробки та надійної інтерпретації даних цифрового аерознімання. Запропоновано технологію підвищення просторової розрізненості шляхом поєднання декількох зображень, субпіксельно зміщених одне відносно одного, та наступного відновлення нового зображення. Подано демонстраційний приклад підвищення просторової розрізненості тестового аерозображення авіаційної цифрової камери 3-DAS-1*

*Ключові слова: аерознімання, субпіксельна реєстрація, просторова розрізненість*

### **Вступ**

Просторова розрізненість – це найважливіша характеристика аерознімання, яка майже завжди є визначальною для виявлення та розпізнавання об'єктів, розрахунку припустимих висот застосування оптико-електронної апаратури, економічних показників картування великих площ [1]. Підвищення просторової розрізненості аерознімання при одночасному збереженні поля огляду оптико-електронної апаратури, вимагає збільшення кількості фотоприймальних елементів (фотодетекторів) в багатоелементному фотоприймальному пристрої [2]. Проте це призводить до суттєвого ускладнення конструкції фотоприймального пристрою, електронного тракту та оптичної системи знімальної апаратури і, як наслідок, до збільшення її вартості. До того ж, безперервне зростання кількості фотодетекторів в фотоприймальних пристроях наштовхується на жорсткі, практично нездоланні фізичні та технологічні обмеження [3, 4].

Для подолання вказаних труднощів може застосовуватися субпіксельна реєстрація аерозображень. Субпіксельна реєстрація полягає в ітераційному отриманні послідовності зображень низької розрізненості однієї і тієї ж сцени, зміщених одне відносно одного на певну частку геометричного розміру пікселя. Для

обчислення значень зображення в дискретних частках пікселів (субпікселях) застосовується програмна обробка набору вхідних зображень низької розрізненості.

### **Попередні дослідження**

Загальна методологія підвищення просторової розрізненості на основі субпіксельної реєстрації зображень передбачає перехід від індивідуальних піксельних сіток вхідних зображень низької розрізненості до спільної субпіксельної сітки вихідного зображення підвищеної розрізненості. В такий спосіб в межах спільного поля огляду формується  $n$  зображень, геометрично зміщених одне відносно одного на  $1/n$  частку пікселя вздовж рядків та стовпчиків. Далі за одним з відомих алгоритмів обчислюються значення зображення в субпікселях спільного поля огляду, тим самим відновлюючи вихідне зображення із субпіксельною розрізненістю [5].

Субпіксельну реєстрацію зображень може бути досягнуто через послідовне маскування певних часток поверхні фотодетекторів багатоелементного фотоприймального пристрою [6], через послідовне лінійне субпіксельне зміщення зображення в фокальній площині вздовж рядків та стовпчиків багатоелементного фотоприймального пристрою [7], а також через послідовне кутове зміщення оптичних осей візування оптико-електронної апаратури вздовж рядків та стовпчиків багатоелементного фотоприймального пристрою [8].

Відомо багато методів, що можуть застосовуватися для відновлення зображень субпіксельної розрізненості [9]. Це може бути нерівномірна інтерполяція [10], регуляризація в просторово-частотній області [11], відновлення за максимумом апостеріорної імовірності [12], оцінювання методом найменших квадратів з обмеженнями [13], проектування на опуклі множини [14], ітеративне зворотне проектування [15], адаптивна узгоджена фільтрація [16] тощо.

Підвищення просторової розрізненості зображень на основі субпіксельної реєстрації, так звана “супер-розрізненість”, є дуже корисною для багатоспектральних і, особливо, для гіперспектральних аерокосмічних зображень [17].

### **Субпіксельна реєстрація зображень**

Для аерознімання субпіксельне зміщення зображень може бути досягнуто за рахунок власного поступального руху носія. Якщо шляхова швидкість носія дорівнює  $V$ , то за час  $t$  зображення у фокальній площині фотоприймального пристрою зміститься на  $f/H V t$ , де  $H$  – висота аерознімання,  $f$  – фокусна відстань оптичної системи оптико-електронної знімальної апаратури. Для забезпечення зміщення зображення на  $1/p$  частку пікселя, час між отриманням сусідніх кадрів або рядків має складати

$$t = \frac{a H \cos \varphi}{p f V}, \quad (1)$$

де  $\varphi$  – кут між подовжньою віссю багатоелементного фотоприймального пристрою і вектором шляхової швидкості носія, як показано на рис. 1.

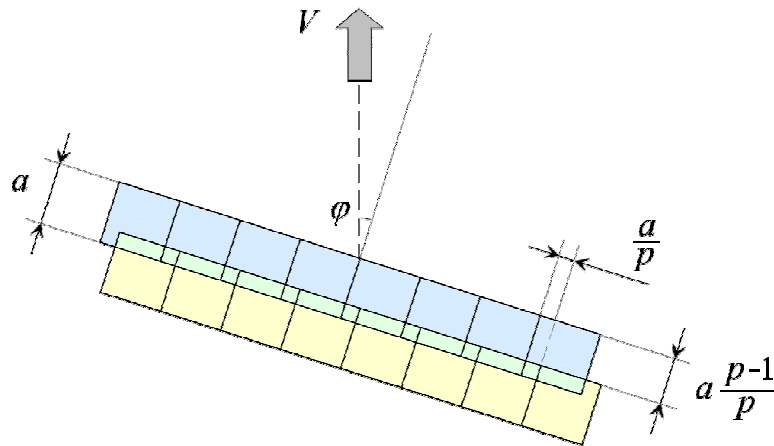


Рис. 1. Субпіксельне зміщення аерозображення за рахунок руху носія

Розворот фотоприймача на кут  $\varphi$  потрібен, щоб забезпечити синхронне зміщення зображення не тільки вздовж стовпчиків, а й одночасно вздовж рядків. У [18] запропоновано робити субпіксельні зміщення вздовж подовжньої та поперечної осей фотоприймача нерівними, щоб отримати більш колінеарну орієнтацію зображення до напрямку польоту. Найменша розбіжність при  $p$  дискретах досягається, якщо зміщення вздовж поперечної осі складає  $1/p$  пікселя, а вздовж подовжньої осі –  $(p-1)/p$  пікселя. Цьому випадку відповідає розворот фотоприймача відносно траєкторії руху точно на

$$\varphi = \arctg \frac{1}{p-1} \quad . \quad (2)$$

Іншим позитивним наслідком зменшення кута розвороту (2) є послаблення обмеження максимально припустимого часу повторення кадрів (рядків) відповідно до (1). Це суттєво пом'якшує вимоги до швидкодії фотоприймального пристрою і тракту виведення зображення.

Нерівні, але дискретно-узгоджені субпіксельні зміщення за різними осями не змінюють принципово алгоритм наступної обробки одержуваної послідовності зображень, а лише модифікують схему підсумовування субпіксельних сигналів всередині кожного пікселя.

### **Відновлення зображень**

Відновлення зображення – це розрахунок значень зображення в субпікселях  $x_{ij}$ ,  $i = 1 \dots n_x + p - 1$ ,  $j = 1 \dots n_y + q - 1$  по відомих значеннях зображення  $y_{ij}$  в пікселях вхідного набору зображень низької розрізненості, зміщених на  $1/p$  та  $1/q$  частки пікселя вздовж осей  $x$  та  $y$  відповідно. Значення пікселів виражаються через субпіксельні зміщення системою рівнянь такого вигляду:

$$y_{ij} = \sum_{k=1}^{i+p-1} \sum_{l=1}^{j+q-1} x_{kl} \quad , \quad i = 1 \dots n_x \quad , \quad j = 1 \dots n_y \quad . \quad (3)$$

Це – система з  $n_x \times n_y$  рівнянь з  $(n_x + p - 1) \times (n_y + q - 1)$  невідомими. Строгий розв'язок системи (3) може бути знайдено за рекурентною формулою:

$$x_{ij} = y_{(i-p+1)(j-q+1)} - \sum_{k=i-p+1}^{i-1} \sum_{l=j-q+1}^{j-1} x_{kl} - \sum_{k=i-p+1}^{i-1} x_{kj} - \sum_{l=j-q+1}^{j-1} x_{il},$$

$$i = p \dots n_x + p - 1, j = q \dots n_y + q - 1. \quad (4)$$

Систему рівнянь (3) може бути переписано в матричній формі як

$$T_1 \times X \times T_2 = Y, \quad (5)$$

де  $X = \{x_{ij}\}$  – матриця невідомих розміром  $(n_x + p - 1) \times (n_y + q - 1)$ ,  $Y = \{y_{ij}\}$  – матриця спостережень розміром  $n_x \times n_y$ ,  $T_1$  –  $p$ -діагональна матриця розміром  $n_x \times (n_x + p - 1)$  з одиницями на діагоналях,  $T_2$  –  $q$ -діагональна матриця розміром  $(n_y + q - 1) \times n_y$  з одиницями на діагоналях.

Можливо довести таке твердження: якщо  $n_x + p - 1$  є кратним  $p$  і  $n_y + q - 1$  є кратним  $q$ , тоді розв’язок системи (5) з найменшою вибірковою дисперсією матриці  $X$  може бути записано у формі

$$X = \text{pinv } T_1 \times Y \times \text{pinv } T_2, \quad (6)$$

де  $\text{pinv } T$  – псевдообернення матриці  $T$  [19].

Щоб запобігти накопиченню шумів, можна застосовувати розв’язок, аналогічний (6), у прямокутному вікні зображення. Нехай лише  $w \times u$  пікселів низької розрізненності використовуються для оцінювання єдиного пікселя підвищеної розрізненності  $x_{ij}$ . Припускаючи, що  $w + p - 1$  та  $u + q - 1$  є непарними числами, розв’язок  $x_{ij}$  з мінімальною вибірковою дисперсією при  $(w + p - 1) \times (u + q - 1)$  невідомих може бути знайдено із системи рівнянь

$$y_{ij} = \sum_{k=i}^{i+p-1} \sum_{l=j}^{j+q-1} x_{kl}, \quad k = i - \frac{(w+p)}{2} - 1 \dots i + \frac{(w-p)}{2}, \quad l = j - \frac{(u+q)}{2} - 1 \dots j + \frac{(u-q)}{2}. \quad (7)$$

Модель з явно включеними шумами спостережених зображень можна записати у вигляді системи рівнянь]

$$X = R \times Y + \varepsilon, \quad (8)$$

де  $X$  – зображення підвищеної розрізненності, розгорнуте у вектор,  $Y$  – кортеж зображень низької розрізненності, розгорнутих у вектори,  $R$  – матриця оператора пересемплювання,  $\varepsilon$  – вектор похибок.

Найкраща лінійна оцінка зображення підвищеної розрізненності  $X$  за  $Y$  буде

$$X = \text{cov } X \times R^T \times (R \times \text{cov } X \times R^T + \text{cov } \varepsilon)^{-1} \times (Y - \text{mean } Y) + \text{mean } X, \quad (9)$$

де  $\text{cov } X$  та  $\text{cov } \varepsilon$  – апіорні коваріаційні матриці зображення підвищеної розрізненності та похибок,  $\text{mean } X$  та  $\text{mean } Y = R \text{mean } X$  – математичні очікування зображення підвищеної розрізненності та вхідних зображень [20]. Якщо розподіли  $X$  та  $\varepsilon$  є гаусівськими, то розв’язок (9) відповідає максимуму апостеріорної імовірності.

У припущенні, що зображення підвищеної розрізненності та похибки є стаціонарними у широкому розумінні, матриці  $\text{cov } X$  та  $\text{cov } \varepsilon$  визначаються відповідними автоковаріаційними функціями, причому матриця є блоково-діагональною, оскільки похибки різних зображень низької розрізненності некорельовані. В цьому разі розв’язок у вікні може бути одержано методом

гаусівської регуляризації [21].

### Результат

Вищевикладені моделі субпіксельної реєстрації та відновлення з образень відпрацьовувалися над реальними аерознімками, одержаними за допомогою багатоспектральної авіаційної цифрової камери 3-DAS-1 виробництва НВП "Геосистема" (рис. 2) [22]. Особливістю конструкції камери 3-DAS-1 є наявність окремих фотоприймальних лінійок для реєстрації різних зональних зображень, і, відповідно, їх субпіксельні незвідності [23]. Цю особливість було застосовано для відновлення зображення підвищеної розрізненості за двома близькими зональними зображеннями.



Рис. 2. Польотний комплект авіаційної цифрової камери 3-DAS-1

Оцінку просторової розрізненості як вхідних, так і відновленого аерозображень отримано за функціями передачі модуляції (ФПМ), експериментально визначеними безпосередньо за відповідними тестовими фрагментами за допомогою спеціального програмного забезпечення [24]. Одержані ФПМ наведено на рис. 3.

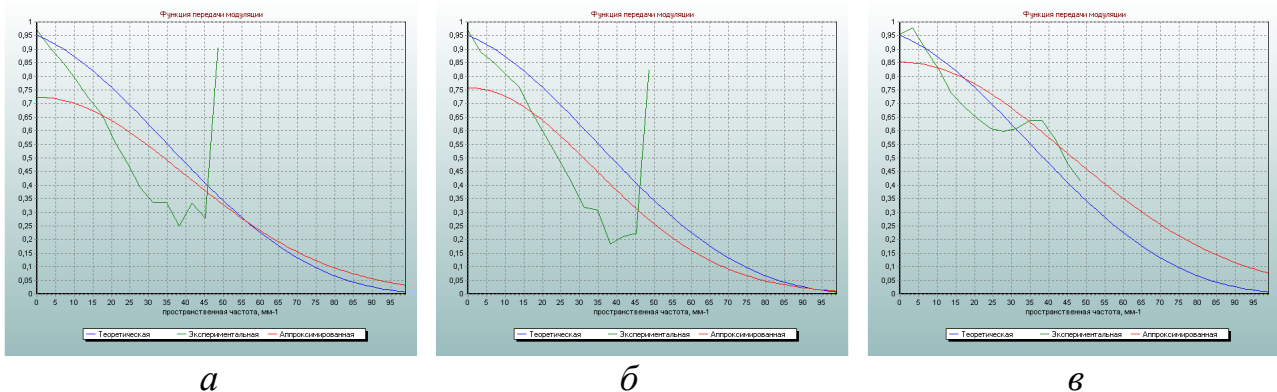


Рис. 3. Функції передавання модуляції тестового аерозображення  
*а, б* – вхідних зональних аерозображень,  
*в* – відновленого аерозображення підвищеної розрізненості

Як видно з графіків рис. 3, значення ФПМ на рівні 0,3 відповідають розрізнявальній здатності  $36 \text{ мм}^{-1}$  для першого зображення (рис. 3а),  $35 \text{ мм}^{-1}$  – для другого зображення (рис. 3б) і  $55 \text{ мм}^{-1}$  – для відновленого зображення (рис. 3в), що є близьким до теоретичної  $60 \text{ мм}^{-1}$ . Отже, відновлене зображення забезпечує покращення просторової розрізненості на 52..57 відсотків навіть для непристосованої спеціально для субпіксельної реєстрації аерознімальної апаратури. За умови вжиття необхідних технічних заходів можна очікувати на ще більш досконалі результати.

### **Висновки**

Таким чином, теоретично обґрунтовано та експериментально продемонстровано можливість підвищення просторової розрізненості аерознімання на основі субпіксельної реєстрації зображень. Проте, викладений підхід має декілька недоліків.

По-перше, це надвеликі обчислювальні витрати, що ступеневно залежать від розмірів вхідних зображень. Відновлення у локальному вікні вирішує проблему не повністю, оскільки стає необхідним піпксельне сканування пересемпльованого зображення. У подальших дослідженнях варто розглянути інші, більш обчислювально ефективні методи відновлення.

По-друге, результати значно погіршуються під впливом стохастичних збурень субпіксельної реєстрації зображень, неминучих в умовах реального польоту. Тому потрібні додаткові дослідження стійкості алгоритмів відновлення.

По-третє, залишилося нерозглянутою модель відновлення зображень у разі нерівних субпіксельних зміщень зображення по різних осях. Її технічна реалізація буде залежати від конструкції конкретної аерознімальної апаратури та обраної логіки субпіксельної реєстрації зображень.

В той же час, описаний підхід до підвищення просторової розрізненості аерознімання на основі субпіксельної реєстрації зображень є досить перспективним і може бути використаний при створенні нових зрізків оптико-електронної аерознімальної апаратури.

### **Подяка**

Це дослідження було підтримано Національною академією наук України (розпорядження Президії НАН України від 27.02.2013 № 133, грант № 10).

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Кононов В.И., Станкевич С.А. Сравнительная оценка информативности цифровых аэрокосмических изображений высокого и низкого разрешения // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского, 2004.– Т.17(56).– № 2.– С.88-95.
2. Станкевич С.А. Аналіз принципів технічної реалізації та застосування зарубіжних авіаційних цифрових систем одержання зображень // Збірник наукових праць Наукового центру ВПС України.– Вип.7.– Київ: НЦ ВПС, 2004.– С.232 - 241.

3. Neumann K.J. Trends for digital aerial mapping cameras // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008.– Vol.XXXVII.– Part B1.– P.551-554.
4. Jacobsen K. Recent developments of digital cameras and space imagery // Proceedings of 8<sup>th</sup> International Symposium GIS Ostrava 2011.– Ostrava-Poruba: Technical University of Ostrava, 2011.– P.175-182.
5. Liu H.Y., Zhang Y.S., Ji S. Study on the methods of super-resolution image reconstruction // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008.– Vol.XXXVII.– Part.B2.– P. 461 - 466.
6. Karybali I.G., Psarakis E.Z., Berberidis K., Evangelidis G.D. An efficient spatial domain technique for subpixel image registration // Signal Processing: Image Communication, 2008.– Vol.23.– No.9. – P. 711-724.
7. Ben-Ezra M., Zomet A., Nayar S.K. Video super-resolution using controlled subpixel detector shifts // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005.– Vol.27.– No.6.– P.977-987.
8. Belenok V.Yu., Burachek V.G., Zatserkovny V.I., Popov M.A., Stankevich S.A. Subpixel image acquisition for detailed aerospace imaging // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Digital Technologies (DT'2011).– Žilina: University of Žilina, 2011.– P.289-293.
9. Park S.C., Park M.K., Kang M.G. Super-resolution image reconstruction: A technical overview // IEEE Signal Processing Magazine, 2003.– Vol.20.– No.3.– P. 21 - 36.
10. Gilman A., Bailey D.G. Near optimal non-uniform interpolation for image super-resolution from multiple images // Proceedings of 21<sup>th</sup> International Conference “Image and Vision Computing New Zealand” (IVCNZ'2006).– Great Barrier Island: University of Auckland, 2006.– P. 31 - 36.
11. Guizar-Sicairos M., Thurman S.T., Fienup J.R. Efficient subpixel image registration algorithms // Optics Letters, 2008.– Vol.33.– No.2.– P.156 - 158.
12. Liu X., Song D., Dong C., Li H. MAP-based image super-resolution reconstruction // Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008.– Vol.27.– No.2.– P. 208 - 211.
13. Gilman A., Bailey D.G., Marsland S. Least-squares optimal interpolation for fast image super-resolution // Proceedings of 5<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Electronic Design, Test and Applications (DELTA'2010).– Ho Chi Minh: IEEE, 2010.– P. 29 - 34.
14. Lei G., Zhiming H. A projection on convex sets super-resolution algorithm using wavelet transform // Proceedings of 9th International Conference on Signal Processing (ICSP'2008).– Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. – P. 1039-1041.
15. Guo W., Pinzheng Zhang P. Super-resolution image reconstruction with iterative back projection algorithm // Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2009.– Vol.3.– No.3.– P. 321- 329.
16. Li D., Simske S. Fast single image super-resolution by self-trained filtering // Proceedings of the 7th international conference on Advanced Intelligent Computing

17. Theories and Applications (ICIC'2011).– Zhengzhou: University of Science & Technology of China, 2011.– P. 469 - 475.
18. Akgun T., Altunbasak Y., Mersereau R.M. Super-resolution reconstruction of hyperspectral images // IEEE Transactions on Image Processing, 2005. – Vol.14. – No.11.– P. 1860 - 1875.
19. Stankevich S.A., Shklyar S.V., Tyagur V.M. Subpixel resolution satellite imaging technique // Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Digital Technologies (DT'2013).– Žilina: University of Žilina, 2013.– P. 81- 84.
20. Ben-Israel A., Greville T.N.E. Generalized Inverses: Theory and Applications. – New York: Springer-Verlag, 2003. – 420 p.
21. Rao C.R. Linear Statistical Inference and Its Application.– N.Y.: John Wiley, 2002. – 656 p.
22. Raj A., Thakur K.P. Fast and stable Bayesian image expansion using sparse edge priors // IEEE Transactions on Image Processing, 2007.– Vol.16.– No.4. – P. 1073-1084.
23. Олейник С.В., Гайда В.Б. Цифровые камеры для аэрофотосъемки // Геопрофи, 2006.– № 4.– С. 45 - 51.
24. 3-DAS-1 Digital Camera Geometry Calibration / Technical Report No.3.– Kiev: Scientific and Research Institute of Geodesy and Cartography, 2007. – 11 p.
25. Станкевич С.А., Шолонік О.В. Інструментарій оцінювання еквівалентної просторової розрізненості багато- та гіперспектральних цифрових аерокосмічних знімків // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації.– Вип. 3(10).– Київ: ДНДІА, 2007.– С. 165-171.

*Надійшла до редакції 10.10.2013*